

Вероятностный подход при моделировании литейных процессов

Несмотря на очевидные успехи и востребованность численного моделирования литейных процессов, базовые физические модели используемые в системах компьютерного моделирования в настоящее время содержат в себе принципиальное отличие от реальной физики моделируемых процессов - тепловых, усадочных и т.п. В данном случае имеется ввиду не те упрощения, существенные или не очень существенные, которые всегда так или иначе отличают модель от реального процесса, а принципиально разную подоплеку реального и моделируемого процесса. Дело в том, что с помощью численного моделирования на компьютере «проигрывается» некоторый строго **детерминированный** процесс, а в реальности большинство литейных процессов являются **вероятностными**. При одинаковых исходных данных результат численного моделирования будет всегда одинаковым. В действительности же при одних и тех же условиях ход реального процесса никогда не повторяется абсолютно.

Известно, что большинство технологических параметров в условиях реального производства в той или иной мере колеблются случайным образом. Однако, это только одна из составляющих вероятностных колебаний. В данном случае речь идет не о колебаниях различных технологических параметров в условиях реального производства, например температуры или скорости заливки, а о том, что большинство литейных процессов являются вероятностными по своей сути, просто в силу большого количества различных одновременно влияющих разномасштабных факторов определяющих ход данного процесса. А неизбежные колебания технологических факторов «усугубляют» возможные нежелательные последствия вероятностных колебаний собственно процесса.

Иногда такие случайные отклонения в ходе процесса, если они лежат в определенных пределах, мало влияют на качество отливки. В частности, достаточно часто при значимых отклонениях например полного времени затвердевания, многие показатели качества отливки остаются удовлетворительным, т.к. относительные времена затвердевания ее различных частей мало меняются. Однако ряд литейных процессов в силу своей физики очень чувствительно реагирует на подобные колебания.

Опытные пользователи систем компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) прекрасно знают об этом. Чтобы добиться надежных результатов моделирования они проводят не один, а несколько расчетов, варьируя наиболее «неконсервативные» параметры, входящие в физические модели, используемые в расчетах. (Кстати, в том числе и поэтому пользователь СКМ ЛП должен достаточно хорошо представлять себе как физику литейных процессов, так и особенности моделей используемых в применяемой им системе моделирования.) В результате

опытный пользователь СКМ ЛП при разработке или оптимизации технологии оперирует не результатами одного расчета, а набором *возможных* результатов к которым приведет использование этой технологии.

Если эти результаты одинаковы, неважно одинаково плохие или одинаково хорошие, то технология является *устойчивой*. Если технология неустойчивая, то часть «виртуальных» отливок может быть удовлетворительного качества, а часть с дефектами. Что собственно зачастую и происходит на практике при использовании *неустойчивых* литейных технологий. Чаще всего технологи-литейщики вынуждены оперировать неустойчивыми технологиями в силу сложности геометрии отливки, конструкторских ограничений, недостатком производственных возможностей данного литейного производства и т.д. (В этих условиях задачи повышения устойчивости технологий или даже просто объективной оценки устойчивости уже применяемых технологий становятся очень актуальными и часто только методы моделирования позволяют решать эти задачи.)

Так или иначе, в настоящее время при ответственном моделировании пользователи СКМ ЛП получают условно «вероятностные» результаты путем проведения некоторой серии однотипных детерминированных расчетов при одинаковой геометрии и части исходных параметров.

Дальнейшее качественное улучшение адекватности моделирования литейных процессов вероятнее всего лежит в плоскости учета непосредственно в расчетных алгоритмах вероятностных аспектов процессов. При этом возможны различные подходы, зависящие от особенностей того или иного моделируемого процесса. В этом смысле наиболее перспективными, с точки зрения скорости вычислений и практической полезности, представляются такие алгоритмы, которые базируются на некоем единственном численном детерминированном решении, которое затем обрабатывается для получения некоторого семейства решений.

Рассмотрим для примера тепловую задачу. С помощью классического численного моделирования можно получить решение тепловой задачи в каждом узле расчетной сетки отливки, т.е. для каждого узла мы имеем кривую охлаждения. На рис. 1 показана такая кривая для одного из узлов сетки. Подобные кривые могут быть получены и аналитическими расчетами, но часть эффективных коэффициентов аналитического уравнения для произвольной геометрии при этом неизвестна. Однако, имея уже готовое численное решение можно найти эти коэффициенты для каждого узла сетки используя минимум вычислительных ресурсов и процессорного времени. Далее, в этих аналитических уравнениях можно варьировать физические параметры, которые могут оказать наибольшее влияние на решение и сразу получить семейство решений, соответствующих различным случаям при вероятностных колебаниях этих параметров. На рис. 1 показаны две кривые охлаждения, соответствующие большей и меньшей интенсивности охлаждения (различные коэффициенты теплопередачи между отливкой и формой) по сравнению с исходным

численным расчетом. Естественно такие обработки будут справедливы только в некотором диапазоне изменений, т.к. при слишком больших изменениях исходных физических параметров изменяется ход затвердевания и эффективные коэффициенты в аналитических уравнениях.

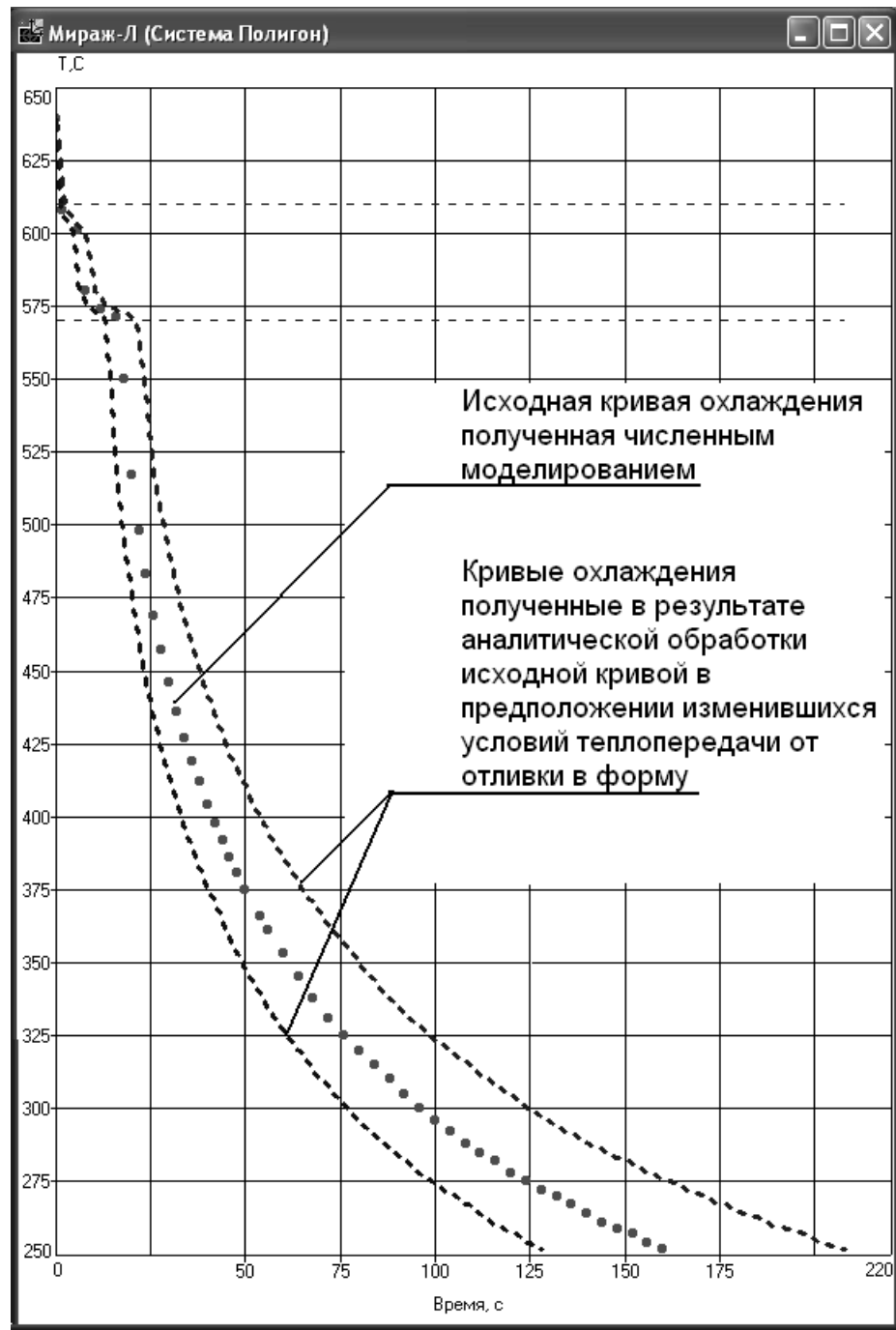


Рис. 1

Температурные графики в одном из узлов расчетной сетки.

Возможны и более сложные варианты обработок результатов исходного численного решения для быстрого получения некоторого семейства вероятных решений. В частности, достаточно интересны для технолога могут быть вероятные картины кинетики затвердевания. На рис. 2 в левой части показаны следы продвижения изолинии 30% жидкого в

некотором сечении, полученные численным расчетом. Это один из стандартных способов визуализации кинетики затвердевания, применяемый в СКМ ЛП. Такой способ визуализации позволяет наглядно увидеть изолированные термические узлы, появляющиеся на различных стадиях затвердевания.



Рис. 2

Расчетная кинетика затвердевания в некотором сечении отливки.

Рассматривая изолинии как некоторые геометрические объекты, связанные друг с другом, геометрией отливки и исходными физическими параметрами некоторыми аналитическими соотношениями, изолинии могут быть определенным образом достаточно быстро обработаны так, чтобы

можно было увидеть вероятную картину кинетики затвердевания например в предположении случайно изменившихся условий теплоотвода. При этом не обязательно пересчитывать температурные кривые полностью, как это было показано в предыдущем примере. На рис. 2 в правой части показаны изолинии при возможных изменениях параметров теплоотвода в нижней части отливки.

Другой возможный подход состоит в том, чтобы непосредственно в процессе численного решения получать некоторые вероятностные оценки распределения вычисляемых функций, например распределения пористости.

Рассмотрим для примера задачу нахождения макропористости.

Хорошо зарекомендовавшая себя модель образования макропористости, используемая (совместно с моделью образования микропористости) в СКМ ЛП «Полигон» предполагает наличие в интервале затвердевания трех критических точек: P_{ln} – доля жидкого при начале линейной усадки («схватывание» дендритного каркаса); P_{lg} – доля жидкого при прекращении гравитационного течения; P_{lo} – доля жидкого при полном перекрытии междендритных каналов (см. рис. 3). Данные точки регламентируют смену поведения расплава в двухфазной зоне с точки зрения протекания процесса образования макропористости (и концентрированных раковин) из-за объемной усадки при затвердевании. От значений этих точек зависит как кинетика падения зеркала расплава в процессе усадки, так и механизм образования макропористости (и ее величина) в различных частях отливки.

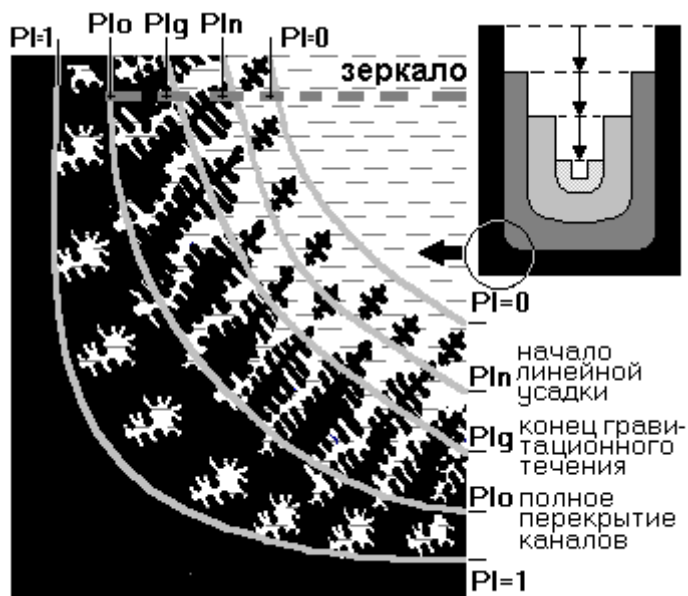


Рис. 3

Критические точки в модели образования макропористости.

При этом опыт показывает, что такого рода параметры, как критические точки, являются существенно *неконсервативным*, т.е. эти параметры имеют тенденцию изменяться случайным образом в относительно широких пределах даже при жестком контроле за стабильностью параметров

используемой литейной технологии. Именно из-за этого невозможно увидеть две абсолютно одинаковые раковины или две абсолютно одинаковые рыхлоты в двух разных отливках, даже если они заливались одновременно при одних и тех же контролируемых условиях. На рис. 4 показаны различные варианты распределения расчетной пористости в некотором слитке при изменении значения критической точки P_{lg} – конца гравитационного течения. Значительный разброс результатов означает, что используемая технология весьма неустойчива, т.е. все эти варианты будут случайным образом проявляться при заливке этих слитков по данной технологии. Если бы технология была устойчивой, то распределения пористости, хотя и несколько различались бы, но были бы во всех вариантах достаточно близкими друг к другу.

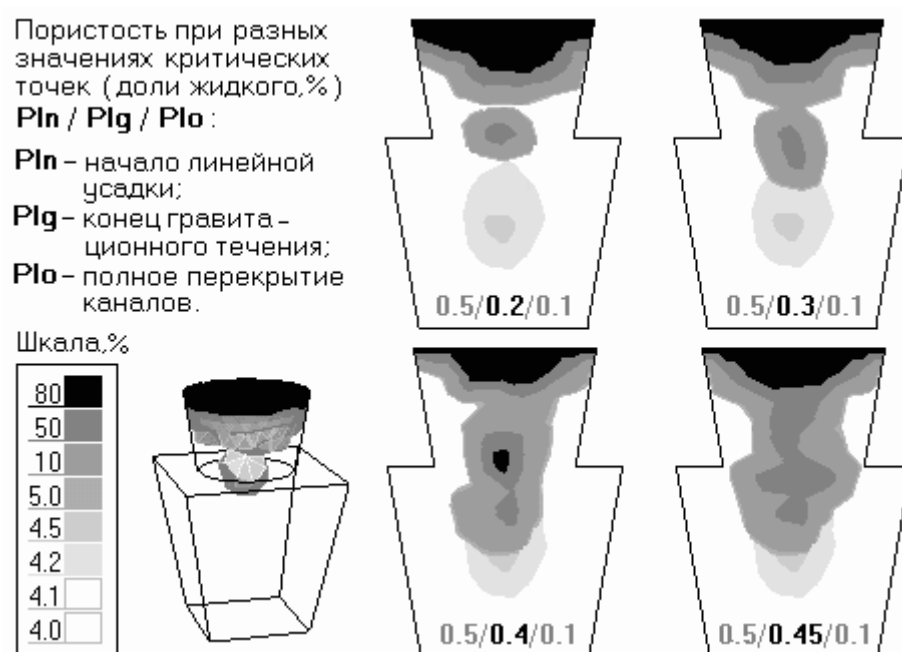


Рис. 4

Изменения в распределении пористости при вероятном изменении значений критических точек.

Для того, что бы учесть различные вероятности проявления макропористости, опытные пользователи СКМ «Полигон» проводят как минимум два численных расчета для условно «мягкого» варианта значений критических точек и условно «жесткого» варианта (см. рис. 5). Это некоторые предельные варианты, показывающие некие «границы» возможных изменений при распределении пористости. При этом, заранее сказать какой вариант будет хуже – «мягкий» или «жесткий» часто невозможно.

Естественно, что тепловые параметры расчета при изменении критических точек остаются неизменными. Для того, чтобы относительно быстро учесть вероятностный характер образования макропористости можно пытаться на каждом расчетном шаге по времени проводить решение задачи

образования пористости сразу по нескольким уровням значений критических точек. Например, можно «зафиксировать» значение P_{ln} и считать, что P_{lo} изменяется от «мягкого» варианта к «жесткому», а P_{lg} является средним между P_{ln} и P_{lo} . Тогда для каждого узла расчетной сетки можно получить сразу семейство значений пористости и даже прогнозировать вероятность появления того или другого значения пористости в данном месте. На рис. 5 в левой части показаны девять возможных вариантов значений критических точек при изменении от мягкого варианта к жесткому. В правой части рис. 5 показана гистограмма значений пористости в некотором узле расчетной сетки при этих девяти вариантах.

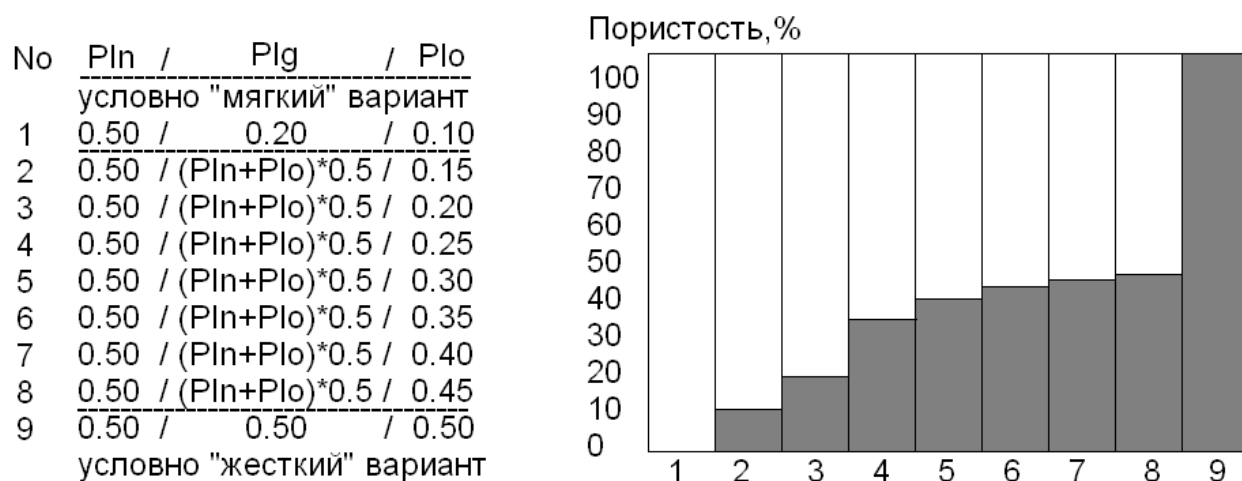


Рис. 5

Различные варианты значений критических точек и значения расчетной пористости для этих вариантов в некотором узле сетки.

Если предположить, что все девять вариантов равновероятны, то по гистограмме в правой части рис. 5 можно увидеть, что хотя в данном узле возможно как появление концентрированной раковины (100% пористости — девятый вариант), так и плотного металла (0% пористости — первый вариант), но наиболее вероятно появление пористости примерно 20%...40%.

И в заключение хочется подчеркнуть, что хотя дальнейшее улучшение моделей и алгоритмов в СКМ ЛП, в том числе и в плоскости введения вероятностных аспектов, безусловно будет происходить, но и современные СКМ ЛП с сугубо детерминированными моделями с успехом применяются как в условиях реального производства, так и в исследовательских целях.